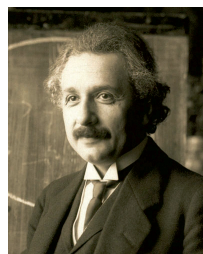


Stulecie Ogólnej Teorii Względności Einsteina

Zbliża się setna rocznica opublikowania pracy Alberta Einsteina, w której sformułował prawa Ogólnej Teorii Względności. Teoria ta powinna raczej nosić nazwę teorii grawitacji. Zwracam uwagę, iż nazwę tę piszemy dużymi literami (OTW) dla podkreślenia jej doniosłości i ogólności. OTW dotyczy grawitacji i geometrii Wszechświata. Teoria ta została wymyślona przez Einsteina w czasie, gdy teoria grawitacji Newtona miała się całkiem dobrze. Jej przewidywania były bardzo ogólne i zadziwiająco dokładne. Fizycy korzystając z niej obliczali zarówno trajektorie pocisków, jak i ruchy planet. Inżynierowie i astronomowie z powodzeniem się nią posługiwali i do tej pory posługują. Prawo grawitacji Newtona, znane jest wam ze szkoły i mówi o wartości siły F oddziaływania grawitacyjnego między dwoma ciałami o masach m_1 i m_2 :



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

gdzie r – odległość między ciałami, G – stała grawitacji. Stała grawitacji ma bardzo małą wartość, dlatego oddziaływanie grawitacyjne jest istotne wtedy, gdy przynajmniej jedno z oddziałujących ciał ma dużą masę. Ziemia ma wystarczająco dużą masę, by przyciągać wszystkie znajdujące się na Ziemi ciała, a także Księżyc.

Znajomość sił grawitacji oraz równania dynamiki Newtona (a – przyspieszenie ciała, F – siła działająca na ciało, m – masa bezwładna)

$$a = \frac{F}{m}, \quad (2)$$

pozwalają na opis ruchu, który doskonale zgadza się z wynikami wszystkich doświadczeń.

W opisie newtonowskim wydarzenia fizyczne odbywają się w trójwymiarowej przestrzeni Euklidesa, w której biegnie absolutny czas. To jest „nasza” przestrzeń, do której jesteśmy tak przyzwyczajeni, że trudno sobie wyobrazić inne przestrzenie. Doskonała zgodność teorii z doświadczeniem sprawiała wrażenie, że fizykom zostały jedynie coraz bardziej skomplikowane przypadki.

Tak było, dopóki Einstein w grudniu 1915 roku nie zaproponował nowej teorii grawitacji. Einsteina niepokoiła w teorii Newtona równość masy grawitacyjnej, tej obecnej we wzorze (1) na siłę grawitacji Newtona i masy bezwładnej w prawach dynamiki Newtona (2). Tak *a priori* nie musiałyby być.

Do postawienia problemu Einstein doszedł rozważając słynne doświadczenia myślowe ze spadającą swobodnie tzw. windą Einsteina. Otóż w spadającej swobodnie windzie obserwator nie będzie nic ważył, nie będzie naciskał stopami na wagę, gdyż waga i inne przedmioty będą spadały swobodnie razem z nim. Obserwatorowi będzie się wydawało, że grawitacja znikła. To będzie zupełnie tak samo, jak na promie kosmicznym. Taki stan każdy sobie może zafundować w locie parabolicznym (który trwa nawet kilkanaście sekund) lub w wesołym miasteczku w spadającej swobodnie windzie. Tutaj ruch z przyspieszeniem grawitacyjnym „znosi” pole grawitacyjne.

Można też zrobić eksperyment z windą przyspieszającą do góry. Pasażer będzie „wgniatany” w podłogę, będzie więcej ważył. Ruch przyspieszony w górę jakby kreuje masę grawitacyjną.

Einstein wspominał:

Pewnego szarego dnia w 1907 r. siedziałem w fotelu w Urzędzie Patentowym w Bernie, kiedy nagle przyszło mi do głowy, że człowiek spadający swobodnie nie będzie czuł własnego ciężaru. Byłem wstrząśnięty. To proste stwierdzenie zrobiło na mnie ogromne wrażenie i zainspirowało do stworzenia teorii grawitacji.

Jeśli bowiem siłę grawitacji można zastąpić efektem przyspieszenia poruszającego się układu, więc, nie może to być realna fizyczna siła (taka jak na przykład siła rozciągająca sprężynę).

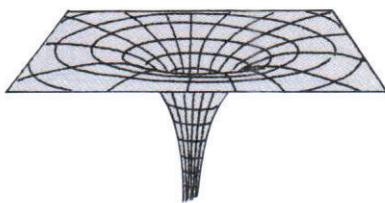
Grawitacja musi być pewną własnością czasoprzestrzeni, w której odbywa się ruch obiektów materialnych.

Im większa masa ciała będącego źródłem siły grawitacji, tym bardziej zniekształca ono czasoprzestrzeń wokół siebie i w ten sposób oddziałuje na inne ciała znajdujące się w pobliżu.



Zrozumienie, że działanie siły grawitacji i przyspieszenia związanego z bezwładnością są bardzo zbliżone, Einstein nazwał **najwspanialszą myślą swojego życia**.

Następny ważny krok w OTW to odstępianie od pojęcia absolutnej trójwymiarowej przestrzeni Euklidesa i absolutnego czasu oraz przejście do pojęcia czterowymiarowej przestrzeni, w której do trzech współrzędnych przestrzennych dochodzi równoprawnie, jako czwarta współrzędna, czas (mnożony przez prędkość światła, musi się przecież zgadzać wymiar). I tu objawił się znowu geniusz Einsteina, który spostrzegł, że jeśli ta czterowymiarowa przestrzeń nie jest płaska jak Euklidesa, tylko zakrzywiona, to ruch w tej przestrzeni może się odbywać, jakby ciała były przyciągane (siłą grawitacji). Czterowymiarową przestrzeń bardzo trudno sobie wyobrazić, ale dla ilustracji można się posłużyć modelem dwuwymiarowym. Zwykle pokazuje powierzchnię lejka, w której w centrum jest spust. Ciało na powierzchni takiego lejka, o ile nie krąży np. po okręgu, jest zasysane do centrum lejka.



Einstein był w lepszej sytuacji niż Newton, który musiał sobie sam stworzyć do dynamiki matematykę (rachunek różniczkowy). Na Einsteina niejako czekały geometrie nieeuklidesowe oraz matematycy ze swoimi rozwiązaniami. Poniżej zapisane jest w bardzo zwięzłej formie słynne równanie grawitacji Einsteina, które wiąże geometryczne własności przestrzeni (po lewej stronie) z materią (po prawej).

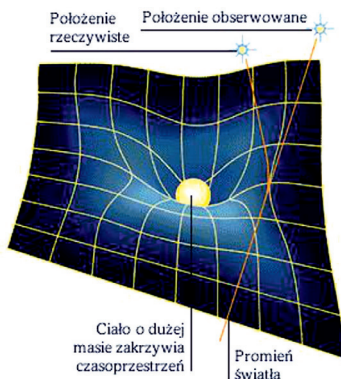
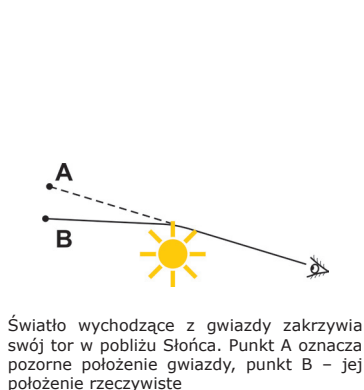
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi}{c^4} G T_{\mu\nu}$$

gdzie:

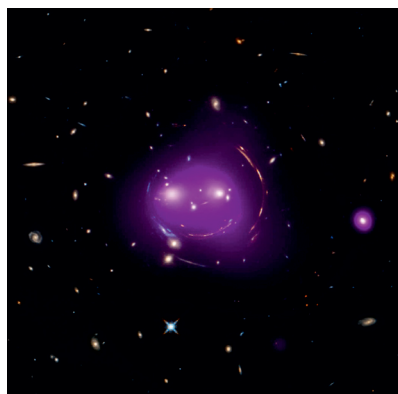
$R_{\mu\nu}$ – tensor krzywizny Ricciego, R – skalar krzywizny Ricciego, $g_{\mu\nu}$ – tensor metryczny, który opisuje metrykę przestrzeni, Λ – stała kosmologiczna, $T_{\mu\nu}$ – tensor energii-pędu, opisujący rozkład materii w czasoprzestrzeni, c – prędkość światła w próżni, G – stała grawitacji.

To jest tylko pozornie proste równanie. W rzeczywistości jest to bardzo skomplikowany układ sześciu równań i fizycy stale szukają jego rozwiązań, bowiem one dają na przykład informacje o powstaniu i ewolucji naszego Wszechświata. Rozwiązania przewidują m.in. istnienie czarnych dziur, które astrofizycy obserwują od dawna. Stale są czynione próby poszukiwania fal grawitacyjnych, które też są konsekwencją prawa grawitacji Einsteina.





Jednym z wniosków wynikających z teorii Einsteina jest przewidywanie, że światło, podobnie jak cząstki posiadające masę, podlega prawu grawitacji, czyli jest przyciągane przez obiekty posiadające masę. Jego trajektoria będzie zatem zakrzywiona w pobliżu obiektu o dużej masie, na przykład Słońca. Był to w czasach Einsteina jedyny doświadczalny, możliwy do zmierzenia efekt.



Zaobserwowanie światła wysyłanego przez gwiazdy, a przechodzącego blisko Słońca możliwe było jedynie podczas zaćmienia Słońca.

I tak w roku 1919 ekspedycja Sir Arthura Eddingtona zmierzyła faktyczne zakrzywienie promieni. To było wydarzenie sensacyjne, o którym pisały gazety na całym świecie. Einstein został celebrytą.

Współcześni astrofizycy mają doskonałe narzędzia – teleskopy, nie tylko na Ziemi, ale też w przestrzeni kosmicznej – i obserwują tak zwane soczewkowanie grawitacyjne. Olbrzymie galaktyki działają jak soczewki (http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/where-alice-in-wonderland-meets-albert-einstein.html).

Čzęsto słyszy się opinię, że Einstein obalił prawa Newtona. Nic bardziej błędnego. Prawa Newtona mają się w dalszym ciągu doskonale i tylko niewiarygodna precyzja współczesnych pomiarów wymaga od nas niekiedy dokonywania poprawek do obliczeń wykonywanych przy wykorzystywaniu fizyki Newtona. Gdybyśmy na przykład polegałi jedynie na obliczeniach newtonowskich, to dokładność GPS-u wynosiłaby paręset metrów, a my mamy znacznie lepszą dokładność.

Współcześni astrofizycy i kosmologowie szukają odpowiedzi na fascynujące pytania, takie jak na przykład: Czy Wszechświat się kurczy?, Czy ekspanduje?, Czy może być stacjonarny? Co to jest tak zwana czarna materia i tajemnicza ciemna energia?

Wybitne umysły głowią się, jak zunifikować teorię grawitacji z mechaniką kwantową. Nie udało się to Einsteinowi, ani nikomu innemu do tej pory.

Pod koniec XIX wieku Maxwell zunifikował, czyli połączył w jednej teorii, oddziaływania magnetyczne z elektrostatycznymi. W XX wieku fizycy zunifikowali

z oddziaływaniami elektromagnetycznymi oddziaływania tak zwane silne i słabe (jądrowe) i zaproponowali Model Standardowy. A grawitacja ciągle jeszcze rzuca fizykom wyzwanie.

Polecamy:

Fizyka wokół nas Paula G. Hewitta, rozdz. 36 „Ogólna Teoria Względności”, s. 860
https://pl.wikipedia.org/wiki/Czarna_dziura#/media/File:Black_hole_lensing_web.gif

Z.G-M